干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

配重浮球覆盖下干旱区平原水库节水率研究①

韩克武[1]， 侍克斌[1]， 杨云鹏[2]， 严新军[1]， 毛海涛[3]， 石 祥[1]
（1 新疆农业大学水利与土木工程学院，新疆 乌鲁木齐 830052； 2 吐鲁番市高昌区水利局，新疆 吐鲁番 838000；
3 重庆三峡学院土木工程学院，重庆 404100）

摘 要： 干旱区平原水库具有水面积大、蒸发强烈等特点，采用直径100 mm的配重浮球来抑制平原水库的无效蒸发。以月为时间尺度，分别从浮球间孔隙造成的蒸发损失率和风浪环境中配重浮球湿润表面造成的蒸发损失率进行研究，最终建立浮球覆盖下水面蒸发抑制率和节水率计算模型。结果表明：(1) 非冰冻期内，浮球间孔隙造成的蒸发损失率呈现先增大后减小，在7月达到全年最高值11.6%；冰冻期内(12月和1月)，浮球间孔隙造成的蒸发损失率达到全年最低值9%。(2)相同覆盖面积下，浮球润湿率随风速的增大呈曲线增长，且覆盖面积越大，润湿率随风速的变化速率越慢。相同风速下，浮球润湿率随覆盖面积的增大呈直线下降。各覆盖面积下，单位面积节水率在7月达到最大值，分别为76.6%、78.1%、79.6%、81.2%；在4月达到最低值，分别为51.9%、54.0%、58.2%、61.3%。综上所述，配重浮球在风浪环境中稳定性好、防蒸发节水率高，是一种较为理想的防蒸发材料。

关 键 词： 干旱区平原水库；配重浮球；润湿率；蒸发抑制率；节水率
文章编号

内陆干旱区淡水资源短缺问题日益突出，如何高效利用有限的水资源是一个亟待解决的问题。我国西北干旱区是水资源短缺最为严重的地区之一[1]，该地区温差较大，气候干燥，降水稀少，蒸发强烈[2-3]。根据已有研究成果估算，新疆平原水库年蒸发量为 26.1×10^8 m^3，年渗漏量为 8.0×10^8 m^3，合计每年损失水量约 34.1×10^8 m^3，即水库蒸发水量约占总损失量的77%[4]。

近年来，关于如何最大限度减少干旱区平原水库无效蒸发，国内外学者主要从以下四方面做了研究。(1) 化学试剂法。陈绍澧等[5]率先在国内进行了分子膜抑制水面蒸发研究，研究表明，采用比重小于水、不溶于水、表面无毛细管结构的有机物、无机物的定形固体小球和十六醇均对水面蒸发有一定的抑制作用，缺点是温度升高会降低分子膜的蒸发抑制率；吴燕等[6-7]以十六醇作为抑制水面蒸发的材料，其蒸发抑制率为50%；杨坤等[8]在水面架设漂浮网格对分子膜抑制水面蒸发进行研究，研究表明：网格中的分子膜蒸发抑制率为26%～30%，无网格的分子膜蒸发抑制率为7%～12%；SAGGAI等[9]采用覆盖分子膜抑制水面蒸发。(2) 水生植物法。王积强等[10-11]采用水花生、蒲草等抑制水面蒸发，平均抑制率为10%～30%。(3) 风屏技术法。WANG等[12]研究发现，大规模林网可以使区域内水面蒸发量降低14%；HIPSEY等[13]研究发现风屏的蒸发抑制率与风速降低率成正相关，水面蒸发量可降低约30%。(4) 物理覆盖法。MATTINEZ等[14]采用不同颜色的单、双层聚乙烯网和单层铝网覆盖水面进行防蒸发研究，研究表明：黑色聚乙烯单层网的防蒸发效果最为显著；AL-HASSOUN等[15]采用棕榈树叶作为抑制水面蒸发的材料，95%、50%覆盖率对应的蒸发抑制率分别为63%、26%；BENZAGHTA等[16]采用明光垫、胶合板片以及镀锌铁皮覆盖水面进行试验，平均蒸发抑制率为40%、33%和26%；ASSOULINE等[17]研究发现水面蒸发抑制率与覆盖面积不成正比关系，相同覆盖面积下

① **收稿日期：** 2019-07-11； **修订日期：** 2019-12-09
基金项目： 新疆水利科技专项资金项目(T201801)；“水利工程重点学科”研究项目(SLXK-YJS-2018-03)；自治区高校科研计划重点项目(XJEDU2016I022)资助
作者简介： 韩克武 (1987-)，男，博士生，主要从事干旱区平原水库防蒸发节水研究. E-mail:595607123@qq.com
通讯作者： 侍克斌 (1957-)，男，教授，博导，主要从事干旱区平原水库防蒸发节水研究. E-mail:xndsg@sina.com

单孔覆盖的蒸发抑制率比均匀分布的多孔覆盖高。上述物理覆盖试验均在静水中进行,但覆盖材料在风浪中的节水效率未做研究。2015 年 8 月美国加利福利亚州的西尔玛水库运用浮球作为水库防蒸发材料,但对浮球应用于水库的防蒸发节水效率未做进一步研究。2017 年 SILVA 等[18]采用浮动圆盘抑制太阳能梯度池水面的蒸发。侍克斌等[4]通过15 a 的室内外试验和理论研究,分析了塑料空心板、PVC 泡沫板、EPS 轻质混凝土加筋浮板等作为防蒸发材料在平原水库运行时的稳定性和节水率,实用性高、节水效果显著。韩克武等[19-20]研究了均质浮球覆盖下干旱区平原水库的年防蒸发节水率。

基于上述关于不同材料的防蒸发节水率研究,本试验选用底部加配重的浮球作为干旱区平原水库防蒸发材料。以月为时间尺度,研究不同月份内配重浮球间孔隙的蒸发损失率和风浪对配重浮球表面润湿造成的蒸发损失率,结合二种蒸发损失率求得配重浮球不同面积下单位面积水域的蒸发抑制率,进而求出单位面积水域的月防蒸发节水效率。

1 材料与研究方法

1.1 材料选择

干旱区平原水库防蒸发材料应具有合适密度、合适强度、憎水、无毒、耐久性强等特点[4]。本试验选用直径 100 mm,质量 50 g(配重 5 g,固定于浮球底部)的高密度聚氯乙烯浮球作为防蒸发材料。与板状或椭圆状防蒸发材料相比,球体的弧形结构使得风浪环境中材料与碰撞物的接触面积减少,降低材料因碰撞造成的磨损,从而增强材料耐久性;在非持续风力作用下浮球会因自身重力作用而返回水面,不会被吹离库区。大面积水域易因风形成波浪,浮球随波浪上下起伏过程中球面被润湿,湿润的球面起不到抑制蒸发的作用。润湿球面的水分大部分沿浮球边壁流入水体,仅有少部分水分吸附在浮球表面。而吸附在球面的水分会被迅速蒸干,蒸干后的浮球边壁仍可起到抑制蒸发的作用。

底部加配重的浮球自身存在重力力矩,风浪中不易上下翻转,其抵抗外力干扰的能力高于普通均质浮球。浮球配重较轻,受自重惯性力作用很小,即使会随风浪做上下轻微运动,波浪仅会润湿水面上部的很小部分球面,并且润湿的部分位于浮球最大水平面以下。

1.2 研究方法

试验地点位于吐鲁番市胜金沟水土保持三期水库,该地区属于典型的大陆性干旱荒漠气候,高温干旱,年均降水量 16.2 mm,年均蒸发量 2 845 mm,平均风速 2.2 m · s^{-1},最大风速 25 m · s^{-1}。试验区 2~11 月为非冰冻期,12~1 月为冰冻期,试验期为一整年。

防蒸发节水结构在水库运行时,采用围栏维护使配重浮球紧密排列,以达到其对水面的最大有效覆盖面积。球体的弧形结构使相邻浮球间在最大横截面处形成 3 点接触,球体之间存在孔隙。浮动圆盘之间孔隙的平均等效直径是浮动圆盘直径的 22.7%[17],对于直径 100 mm 的浮球,浮球间单个孔隙的平均直径为 0.022 7 m,经计算浮球间的孔隙率为 9%,即浮球覆盖下的水面仍有 9% 水域处于未覆盖状态。因此对配重浮球覆盖下水面蒸发损失的研究需从以下两方面进行:(1) 9% 未覆盖水域的蒸发损失;(2) 风浪作用下润湿浮球表面水分的蒸发损失。

1.2.1 浮球间孔隙蒸发损失率试验 水库坝顶布设开口面积均为 1 m^2 的 A、B 蒸发器,蒸发器外边壁及底部均由相同厚度的绝热保温棉包裹。A 蒸发器内水面用直径为 100 mm 的银灰色浮球全覆盖,B 蒸发器作为空白对照不覆盖任何材料。两蒸发器内水位变化可通过水位测针进行观测,观测精度为0.1 mm,每天 20:00 对两蒸发器内水位进行观测记录。同时采用自动气象站对大气温度、湿度、风速、大气压的气象数据进行监测。因两蒸发器中水面蒸发强度不同,水量会出现不同程度减少,每隔 3 d 于 20:00 记录数据后将两蒸发器内的水位补充到相同高度。补充的水源由相同型号的第三个蒸发器(储水)提供,以减少补水时水温变化对蒸发量的影响。

根据浮球间孔隙蒸发损失率试验,可将浮球间孔隙蒸发损失率定义为浮球覆盖水体后水面蒸发量与相同条件下自然水体蒸发量的比值。

$$\alpha_1 = \frac{e_1}{e_0} \quad (1)$$

式中:α_1 为浮球间孔隙蒸发损失率;e_0 为 B 蒸发器的蒸发量;e_1 为 A 蒸发器的蒸发量。

1.2.2 风浪环境中浮球润湿率试验 试验在水库受风良好、四周开阔的水域进行。为保证浮球的有效覆盖面积,将浮球紧密排列在 4 个不同面积围栏

内($1\ m^2$、$2\ m^2$、$3\ m^2$、$4\ m^2$)。围栏由直径100 mm的PVC发泡浮球串联后首尾相接构成,同时将其固定在坝坡上(图1)。



图1　试验现场布置

Fig. 1　Experimental layout

因浮球自重对波浪的削减,浮球覆盖下的波浪(能量)沿其前行方向逐级递减,同一围栏内浮球的润湿表面积亦逐级减小。为便于观测统计围栏内所有浮球润湿表面积,根据各围栏内每一排浮球表面润湿的情况,将围栏内群体浮球沿风浪前进的方向分为前、中、后三部分。统计出围栏内每一部分单体浮球的平均润湿表面积,进而计算出围栏内所有浮球润湿的总面积。通过对不同风速段下各围栏内浮球润湿表面积的重复观测分析,求出不同风速段下各围栏内所有浮球润湿表面积的平均值,见公式(2)。

$$S=\frac{S_1+S_2+\cdots+S_n}{n} \tag{2}$$

式中:S为某风速段下各围栏内浮球润湿表面积的平均值;$S_n(n=1,2,\cdots)$为第n次观测某风速段下各围栏内所有浮球润湿的表面积;n为重复观测的总次数。

浮球润湿率α是指某一围栏内浮球被波浪润湿的表面积S(不含静水状态下水面以下的表面积)与静水状态下水面上方浮球表面积S_0的比值。

$$\alpha=\frac{S}{S_0}\times 100\% \tag{3}$$

1.2.3　配重浮球的蒸发抑制率　假设吸附在配重浮球表面水分的蒸发速率与水库水面蒸发速率相同,则配重浮球润湿率即为浮球表面造成的蒸发损失率。结合浮球间9%孔隙的蒸发损失率和某一风速下配重浮球润湿率,计算出相同条件下配重浮球覆盖水面的蒸发抑制率,见公式(4)。

$$k=1-\alpha(1-\alpha_1)-\alpha_1 \tag{4}$$

式中:k为蒸发抑制率;α为某一风速段内浮球的润湿率,冰冻期取0;α_1为浮球间9%孔隙在各月的蒸发损失率。

1.2.4　配重浮球的各月节水率　将自然状态下的蒸发量、不同风速出现的频率以及对应风速下的蒸发抑制率,带入式(5)计算得出不同覆盖面积下单位面积水域的月防蒸发量。

$$E_i'=E_i\times\sum_{j=1}^{12}P_j\times k_j \tag{5}$$

式中:E_i'为$i(i=1,2,\cdots,12)$月不同覆盖面积下单位面积水域的月防蒸发量;E_i为自然状态下第i月的水面月蒸发量;P_j为i月第j风速段出现的频率;k_j为不同覆盖面积时第j风速段下配重浮球的蒸发抑制率。

配重浮球覆盖下单位面积水域的月防蒸发量与自然状态下月蒸发量之比即为各月节水率η_i,见公式(6)。

$$\eta_i=\frac{E_i'}{E_i}=\sum_{j=1}^{12}P_j\times k_j \tag{6}$$

2　结果与分析

2.1　浮球间9%孔隙的蒸发损失率分析

物理覆盖主要是通过改变水体或水面附近大气的物理特性达到减少蒸发所需的能量(太阳能或风能)的目的。漂浮覆盖主要是通过反射了一部分进入水体的太阳辐射来降低水温,从而起到抑制水面蒸发的作用,同时漂浮物在垂直和水平的水汽扩散通道中充当物理障碍物的角色[21]。浮球的覆盖大幅度降低太阳对水面的净辐射,减少水面蒸发所需的能量来源。

因蒸发器边壁的限制,蒸发器内浮球间的孔隙率为14%,将A、B蒸发器内月蒸发量带入公式(1)中即可求得2~11月14%孔隙对应的逐月蒸发损失率。而水库现场大面积铺设浮球时,浮球间的孔隙率为9%,可根据已有研究成果[19]推算全年不同月份内浮球间9%孔隙所对造成的蒸发损失率(图2)。试验区冰冻期为12~1月,下雪量极少,库区

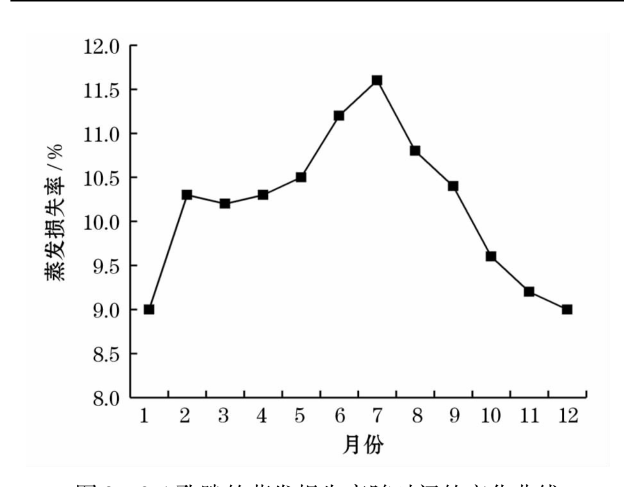


图2　9%孔隙的蒸发损失率随时间的变化曲线

Fig. 2　Curves of evaporation loss rate from the open as time changes

冰面无积雪,冰冻期的蒸发损失主要来自冰面蒸发。冰冻期,太阳辐射弱,浮球表面温度与大气温度相同,浮球对冰面附近微气候影响很小。假设9%未覆盖的冰面蒸发速率与自然环境下冰面蒸发速率是相近的,即浮球覆盖下冰面的蒸发损失率为9%。

经一年试验观测,相同条件下9%孔隙造成的年平均蒸发损失率为10.2%;其中非冰冻期的平均蒸发损失率为10.4%,冰冻期平均蒸发损失率为9%。由图2可知,在一完整自然年内,浮球间9%孔隙的蒸发损失率随时间变化先增大后减小,在7月达到最大值11.6%。

2.2　风速分析

因自然风速的随机性,为便于计算,将试验期内的风速情况以天(d)为单元进行统计。结合气象站在非冰冻期(2~11月)采集的风速资料和不同风速下观测的配重浮球润湿表面积,对风速进行区间划分,依次划分为:0.0~1.5 m·s^{-1}、1.6~2.0 m·s^{-1}、2.1~3.0 m·s^{-1}、3.1~4.0 m·s^{-1}…10.1~11.0 m·s^{-1}、>11.0 m·s^{-1},共12个风速段。表1为每月12个风速段出现的频率。

由表1可知,试验区各月风速主要集中在2.1~4.0 m·s^{-1},其中5月、6月、7月中,2.1~3.0 m·s^{-1}风速段出现频率最高,分别为58.1%、40.0%、48.8%。出现7.0 m·s^{-1}以上风速段主要集中在3月和4月,出现频率分别为29.0%和33.3%,其中4月出现11.0 m·s^{-1}以上风速段的频率是10%,为全年之最。

2.3　风浪作用下配重浮球润湿率的分析

相同覆盖面积下,浮球润湿率随风速的增大呈曲线性增长。风速越大,围栏内浮球对波浪的削减效果越差、自身稳定性降低,浮球润湿率增大。从曲线斜率分析,覆盖面积越大,浮球润湿率受风速变化影响越小(图3)。相同风速下,浮球润湿率随覆盖面积的增大呈直线下降。覆盖面积越大,浮球对波浪的削减效果越显著,润湿率越小(图4)。风速在0.0~1.5 m·s^{-1}时,水面形成的波浪较小,浮球润湿率为0;随风速的增大,相同覆盖面积下浮球的稳定性逐渐降低,润湿率逐渐增大。因围栏高度有限,当风速大于11.0 m·s^{-1}时,4个围栏内均有浮球逸出,围栏内浮球整体稳定性降低,浮球润湿率均达到100%(表2)。

表1　各月不同风速段出现的频率 / %

Tab. 1　Number of days and frequency of different wind speed every month / %

风速/ m·s^{-1}	月份									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0.0~1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	6.5	0.0	0.0	0.0	0.0
1.6~2.0	21.4	6.5	10.0	6.5	26.7	19.4	29.0	16.7	16.1	13.3
2.1~3.0	28.6	32.3	30.0	58.1	40.0	48.4	32.3	26.7	19.4	30.0
3.1~4.0	17.9	16.1	10.0	25.8	16.7	9.7	25.8	36.7	22.6	20.0
4.1~5.0	28.6	12.9	0.0	0.0	0.0	16.1	0.0	0.0	25.8	26.7
5.1~6.0	0.0	3.2	16.7	0.0	13.3	0.0	0.0	0.0	3.2	0.0
6.1~7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.5	16.7	6.5	3.3
7.1~8.0	0.0	6.5	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	3.3
8.1~9.0	0.0	3.2	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9.1~10.0	3.6	6.5	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	0.0
10.1~11.0	0.0	6.5	3.3	6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
>11.0	0.0	6.5	10.0	3.2	0.0	0.0	6.5	3.3	0.0	3.3

表 2 不同风速下配重浮球的润湿率

Tab. 2 Wetted rate of weighted floating balls under different wind speed

风速 / m·s⁻¹	润湿率 / %			
	1 m²	2 m²	3 m²	4 m²
0.0~1.5	0	0	0	0
1.6~2.0	4	4	3	3
2.1~3.0	13	11	10	8
3.1~4.0	20	16	15	13
4.1~5.0	27	25	19	15
5.1~6.0	33	29	25	26
6.1~7.0	40	33	33	31
7.1~8.0	50	45	42	40
8.1~9.0	76	70	60	58
9.1~10.0	100	100	68	65
10.1~11.0	100	100	81	74
>11.0	100	100	100	100

注:试验过程中,风速在 1.5 m·s⁻¹ 以下时浮球覆盖下的水面视为静水状态,浮球率为 0

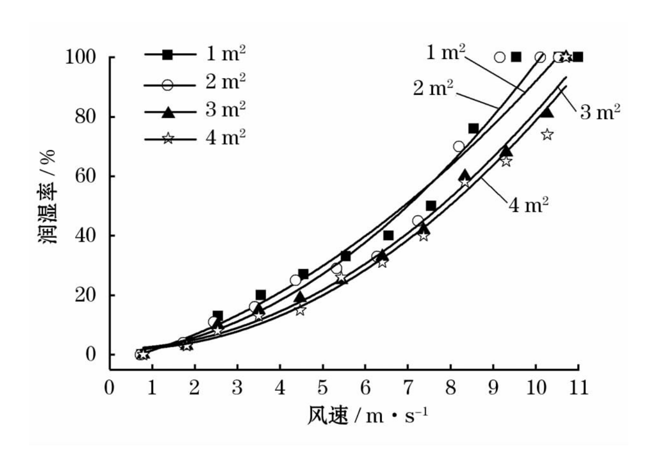


图 3 不同风速下浮球润湿率曲线

Fig. 3 Curves of the wetting rate of floating balls with the wind speed change

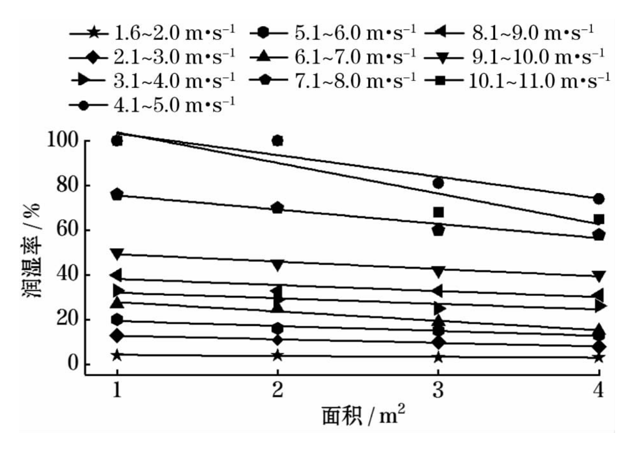


图 4 浮球润湿率随面积变化曲线

Fig. 4 Curves of the wetting rate of floating balls with the coverage area changes

2.4 蒸发抑制率计算

将不同月份浮球间 9% 孔隙的蒸发损失率和风速下配重浮球润湿率(表 2)不同带入公式(4),即可求得不同月份内各风速段下配重浮球的蒸发抑制率。以 3 月数据为例,该月各风速段下不同面积围栏内配重浮球的蒸发抑制率计算结果见表 3。

表 3 各风速段下配重浮球的蒸发抑制率

Tab. 3 Evaporation inhibition rate of weighted floating balls under different wind speeds

风速 / m·s⁻¹	蒸发抑制率 / %			
	1 m²	2 m²	3 m²	4 m²
0.0~1.5	89.8	89.8	89.8	89.8
1.6~2.0	86.2	86.2	87.1	87.1
2.1~3.0	78.1	79.9	80.8	82.6
3.1~4.0	71.8	75.4	76.3	78.1
4.1~5.0	65.6	67.4	72.7	76.3
5.1~6.0	60.2	63.8	67.4	66.5
6.1~7.0	53.9	60.2	60.2	62.0
7.1~8.0	44.9	49.4	52.1	53.9
8.1~9.0	21.6	26.9	35.9	37.7
9.1~10.0	0.0	0.0	28.7	31.4
10.1~11.0	0.0	0.0	17.1	23.3
>11.0	0.0	0.0	0.0	0.0

2.5 各月节水率

将 3 月不同风速段出现的频率和各风速段对应的蒸发抑制率带入公式(6),即求得 3 月配重浮球覆盖下单位面积水域的防蒸发节水率(表 4)。

同理,可计算出各月不同覆盖面积下单位面积水域的防蒸发节水率。12 月、1 月为冰冻期,水面的蒸发损失仅由浮球间 9% 的孔隙造成,浮球节水率与冰冻期的蒸发抑制率相同,即节水率为 91%;2~11 月为非冰冻期,浮球覆盖下单位面积水域防蒸发节水率随总覆盖面积的增大而增大;不同覆盖面积下,4 月浮球节水率均为各月最低值,分别为 51.9%、54.0%、58.2%、61.3%,7 月浮球节水率均为各月最高值,分别为 76.6%、78.1%、79.6%、81.2%(图 5)。由表 3 和公式(6)可知,各月内浮球防蒸发节水率与该月不同风速出现的频率有关,其中风速越大、出现频率越高,当月配重浮球防蒸发节水率越低。

3 结 论

本文以配重浮球作为干旱区平原水库防蒸发材

表 4 不同风速下配重浮球的节水率

Tab. 4 Water saving efficiency of weighted floating balls under different wind speed

风速 / m·s^{-1}	频率 / %	蒸发抑制率 / %				节水率 / %			
		1 m^2	2 m^2	3 m^2	4 m^2	1 m^2	2 m^2	3 m^2	4 m^2
0.0 ~ 1.5	0.00	89.8	89.8	89.8	89.8	0.0	0.0	0.0	0.0
1.6 ~ 2.0	6.45	86.2	86.2	87.1	87.1	5.6	5.6	5.6	5.6
2.1 ~ 3.0	32.26	78.1	79.9	80.8	82.6	25.2	25.8	26.1	26.7
3.1 ~ 4.0	16.13	71.8	75.4	76.3	78.1	11.6	12.2	12.3	12.6
4.1 ~ 5.0	12.90	65.6	67.4	72.7	76.3	8.5	8.7	9.4	9.8
5.1 ~ 6.0	3.23	60.2	63.8	67.4	66.5	1.9	2.1	2.2	2.1
6.1 ~ 7.0	0.00	53.9	60.2	60.2	62.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7.1 ~ 8.0	6.45	44.9	49.4	52.1	53.9	2.9	3.2	3.4	3.5
8.1 ~ 9.0	3.23	21.6	26.9	35.9	37.7	0.7	0.9	1.2	1.2
9.1 ~ 10.0	6.45	0.0	0.0	28.7	31.4	0.0	0.0	1.9	2.0
10.1 ~ 11.0	6.45	0.0	0.0	17.1	23.3	0.0	0.0	1.1	1.5
>11.0	6.45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
总计	100.00					56.3	58.3	63.0	65.1

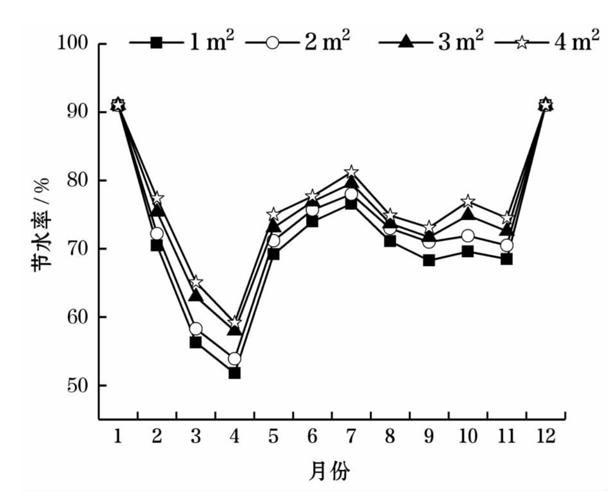


图 5 不同月份配重浮球覆盖下单位面积水域防蒸发节水率变化曲线图

Fig. 5 Curves of the water-saving efficiency of floating balls every month

料,在水库现场分别对配重浮球间孔隙蒸发损失率、风浪环境中不同覆盖面积下配重浮球表面润湿率和各月不同风速区间出现的频率进行观测。从理论上分析了配重浮球防蒸发节水率、蒸发抑制率和不同风速区间出现的频率三者之间的关系。最终依据所测结果得出各月内配重浮球防蒸发节水率。其结论如下:

(1) 2 ~ 11 月为非冰冻期,随时间的变化,浮球间孔隙的蒸发损失率先增大后减小,在 7 月达到全年最高值 11.6%;12 月和 1 月为冰冻期,浮球间孔隙的蒸发损失率为 9%,为全年最低值。

(2) 相同覆盖面积下,浮球润湿率随风速的增大呈曲线增长,且覆盖面积越大,润湿率随风速的变化速率越慢。相同风速下,浮球润湿率随覆盖面积的增大呈直线下降。

(3) 配重浮球防蒸发节水率为各风速区间出现的频率与各风速区间对应的蒸发抑制率乘积之和。

(4) 在非冰冻期的同一月内,单位面积节水率随覆盖面积的增大而增大。各覆盖面积下,单位面积节水率在 7 月达到最大值,分别为 76.6%、78.1%、79.6%、81.2%,在 4 月达到最低值,分别为 51.9%、54.0%、58.2%、61.3%。在冰冻期内各覆盖面积下单位面积节水率为 91%。

(5) 与普通均质浮球相比,风浪环境中配重浮球抗干扰力强,稳定性好,节水率高。

参考文献(References)

[1] 贺可,吴世新,杨怡,等. 近 40 a 新疆土地利用及其绿洲动态变化[J]. 干旱区地理,2018,41(6):1333 - 1340. [HE Ke, WU Shixin, YANG Yi, et al. Dynamic changes of land use and oasis in Xinjiang in the last 40 years[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(6):1333 - 1340.]

[2] 杜铭霞,张明军,王圣杰,等. 新疆夏半年降水观测误差分析和修正[J]. 干旱区地理,2017,40(6):1143 - 1151. [DU Mingxia, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. Analysis and correction of errors in precipitation measurement in Xinjiang during summer half year[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(6):1143 - 1151.]

[3] 谢友文,张慧琴,朱浩,等. 吐鲁番盆地人工增水作业区域与作业时机选择[J]. 干旱区地理,2017,40(5):958 - 966. [XIE Youwen, ZHANG Huiqin, ZHU Hao, et al. Artificial anstau area

and operation opportunity selection in Turpan Basin[J]. Arid Land Geography,2017,40(5):958 - 966.]

[4] 侍克斌,严新军,陈亮亮. 内陆干旱区平原水库节水及周边土壤盐渍化防治[M]. 北京:中国水利水电出版社,2016:19 - 128.[SHI Kebin,YAN Xinjun,CHEN Liangliang. Water saving in the plain reservoirs in the inland arid region and prevention of salinization in surrounding soil[M]. Beijing:China Water Conservancy and Hydropower Press,2016:19 - 128.]

[5] 陈紹澧,黄斌才. 几种表面复盖物对降低水表面蒸发的效应[J]. 地球物理学报,1959,8(2):132 - 137.[CHEN Shaoli, HUANG Bincai. Retardation of the surface evaporation of water by certain surface coatings[J]. Chinese Journal Geophysics,1959,8(2):132 - 137.]

[6] 吴燕,夏萍,衣守志. 脂肪醇乳液抑制水分蒸发的研究[J]. 功能材料,2007,38(9):3408 - 3411.[WU Yan,XIA Ping,YI Shouzhi. Study on suppression of water evaporation by alcohol alcohol emulsion[J]. Journal of Functional Materials,2007,38(9):3408 - 3411.]

[7] 夏萍,吴燕,王秉文,等. 自然环境下水分蒸发抑制剂的研究[J]. 环境科学与管理,2008,33(12):20 - 22.[XIA Ping,WU Yan,WANG Bingwen,et al. Study on water evaporation retardant under natural environment[J]. Environmental Science and Management,2008,33(12):20 - 22.]

[8] 杨坤,叶含春,肖让,等. 南疆地区多浪水库漂浮网格法阻蒸发制剂阻蒸发效率实验[J]. 水电能源科学,2015,33(11):136 - 139.[YANG Kun,YE Hanchun,XIAO Rang,et al. Efficiency test of hindering evaporation preparations based on floating grid of mitigate wind and waves in Xinjiang area[J]. Water Resources and Power,2015,33(11):136 - 139.]

[9] SAGGAI S,BACHI O E K. Evaporation reduction from water reservoirs in arid lands using monolayers:Algerian experience[J]. Water Resources,2018,45(2):280 - 288.

[10] 王积强. 水生植物对水面温度和蒸发量的影响[J]. 干旱区地理,1994,17(2):67 - 69.[WANG Jiqiang. The effect of hydrophyte for water surface temperature and evaporation[J]. Arid Land Geography,1994,17(2):67 - 69.]

[11] 丁成. 水草对水面蒸发的影响分析[J]. 甘肃水利水电技术,2009,45(1):17 - 18.[DING Cheng. Analysis on the effect of water plant on water surface evaporation[J]. Gansu Water Conservancy and Hydropower Technology,2009,45(1):17 - 18.]

[12] WANG H,TAKLE E S,SHEN J. Shelterbelts and windbreaks:Mathematical modeling and computer simulations of turbulent flows[J]. Annual Review of Fluid Mechanics,2001,33(1):549 - 586.

[13] HIPSEY M R,SIVAPALAN M,CLEMENT T P. A numerical and field investigation of surface heat fluxes from small wind-sheltered water bodies in semi-arid western Australia[J]. Environmental Fluid Mechanics,2004,4(1):79 - 106 .

[14] MATTINEZ-AlVAREZ V,BAILLE A,MOLINA Martinez J M,et al. Efficiency of shading materials in reducing evaporation from free water surfaces[J]. Agricultural Water Management,2006,84(3):229 - 239.

[15] AL-HASSOUN S A,MOHAMMED T A,NURDIN. Evaporation reduction from impounding reservoirs in arid areas using palm leaves[J]. Research Journal of Applied Sciences,2009,4(4):247 - 250.

[16] BENZAGHTA, MOHAMMED. Testing of evaporation reduction methods in humid climates[J]. Water Management,2012,166(WM4):207 - 216.

[17] ASSOULINE S,NARKIS K,OR D. Evaporation suppression from water reservoirs:Efficiency considerations of partial covers[J]. Water Resources Research,2011,47(4):1 - 8.

[18] SILVA C,GONZALEZ D,SUAREZ F. An experimental and numerical study of evaporation reduction in a salt-gradient solar pond using floating discs[J]. Solar Energy,2017,142:204 - 214.

[19] 韩克武,侍克斌,严新军,等. PE 浮球覆盖下干旱区平原水库静水水面蒸发抑制率研究[J]. 水资源与水工程学报,2017,(4):235 - 239.[HAN Kewu,SHI Kebin,YAN Xinjun,et al. Study on the inhibition rate of the still water evaporation under the PE floating ball coverage in arid zone plain reservoir[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2017,(4):235 - 239.]

[20] 韩克武,侍克斌,严新军,等. PE 浮球覆盖下干旱区平原水库防蒸发节水效率分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2020,28(2):376 - 385.[HAN Kewu,SHI Kebin,YAN Xinjun,et al. Analysis on water saving efficiency of PE spheres covering plain reservoirs in arid area[J]. Journal of Basic Science and Engineering,2020,28(2):376 - 385.]

[21] XI Yao,HONG Zhang,CHARLES Lemckert,et al. Evaporation reduction by suspended and floating covers:Overview,modelling and efficiency[R]. Queensland:Urban Water Security Research Alliance,2010.

Water saving efficiency of weighted floating balls covering plain reservoir in arid area

HAN Ke-wu[1], SHI Ke-bin[1], YANG Yun-peng[2], YAN Xin-jun[1], MAO Hai-tao[3], SHI Xiang[1]

(1 *College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi* 830052, *Xinjiang, China*;

2 *Turpan Gaochang District Water Conservancy Bureau, Turpan* 838000, *Xinjiang, China*;

3 *College of Civil Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing* 404100, *China*)

Abstract: Considering the characteristics of a large water area and strong evaporation of the plain reservoir in an arid area, the invalid evaporation of the water surface could be restrained by covering the plain reservoir with weighted floating balls having diameters of 100 mm. We studied the monthly evaporation loss from the openings among the floating balls and the wetted surface areas of the weighted floating balls in the wind-wave environment. The research methods used herein are as follows: (1) Evaporation loss from the openings among floating balls: A and B evaporators with an area of 1 m^2 are placed at the top of the dam. The water surface of the A evaporator is covered by floating balls, and the B evaporator is used as a blank control without covering any material. By observing and analyzing the evaporation in these evaporators, we can obtain the evaporation loss rate caused by the openings. (2) Evaporation loss caused by the wetted surface of weighted floating balls in the wind-wave environment: The experiment was conducted in the reservoir with good wind and open water around. The floating balls were closely arranged in four different area fences (1 m^2, 2 m^2, 3 m^2, and 4 m^2). We observed and analyzed the wetted surface area of the floating balls in the four fences under different wind speeds and calculated the wetting rate of the floating balls in the four fences. The evaporation inhibition rate per unit area of water under the different areas of the weighted floating balls was obtained by combining the two types of evaporation loss rates, and the monthly water-saving efficiency of the weighted floating balls was calculated. Results showed the following: (1) During the non-freezing period from February to November, the evaporation loss rate from the openings among spheres initially increased and then decreased, reaching the highest value of 11.6% in July. During December-January, the evaporation loss rate was 9%, which was the lowest value in the whole year. (2) The water-saving efficiency of the weighted floating balls is the sum of the product of the frequency appearing in each wind speed interval and the evaporation inhibition rate corresponding to each wind speed interval. (3) Under the same coverage area, the wetting rate of the floating balls increased with the increase in wind speed. The larger the coverage area, the slower the wetting rate changed with the wind speed. At the same wind speed, the wetting rate linearly decreased with the increase in coverage areas. In the same month of the non-freezing period, the water-saving efficiency per unit area increased with the increase in the coverage area. Under each coverage area, the water-saving efficiency per unit area reached the maximum in July at 76.6%, 78.1%, 79.6%, and 81.2%, and it reached the minimum in April at 51.9%, 54.0%, 58.2%, and 61.3%. (4) Compared with the ordinary homogeneous floating balls, the weighted floating balls in the wind-wave environment possess strong anti-interference ability, good stability, and high anti-evaporation and water-saving efficiency.

Key words: plain reservoir in arid area; weighted floating balls; wetting rate; evaporation inhibition rate; water saving efficiency